

文章编号 1004-924X(2008)02-0367-07

基于序列局部图像的高精度测量

何博侠,张志胜,戴敏,史金飞

(东南大学机械工程学院,江苏南京211189)

摘要:研究了基于序列局部图像的视觉测量方法。分析了机械零件图像边缘的过渡分布特征,提出用边缘像素补偿法来消除实际边缘不能精确定位对测量精度的影响。以直线边缘距离测量为原型,提出了基于序列局部图像尺寸特征的测量方法:对零件进行微小区域成像,生成在空间上连续的序列局部图像;应用相关系数法和双线性插值法获得相邻序列图像的亚像素级尺寸特征线,从而得到各局部图像的尺寸特征;对这些尺寸进行求和与补偿,得到零件的总体尺寸。实验结果表明,对常规尺寸零件的单幅图像运用边缘像素补偿法,相对测量误差在0.008%以内;对大尺寸零件应用序列图像测量法,相对测量误差在0.01%以内,并具有误差积累小的优点。本文算法可基本满足板类零件的精密自动化测量要求。

关键词:视觉测量;图像处理;序列图像;边缘补偿;特征匹配

中图分类号:TP391.4;TG806 **文献标识码:**A

A high-precision dimension measurement method based on sequential partial images

HE Bo-xia, ZHANG Zhi-sheng, DAI Min, SHI Jin-fei

(School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: A vision measurement method based on dimension characteristics of sequential partial images is proposed. The transition distribution modality of part edge image and its effect on measurement accuracy are analyzed. To get rid of the effect, an edge pixel compensation method is proposed to available improve measurement accuracy. By taking the dimension measurement of straight edge parts as prototype, the vision measurement method based on dimension characteristics of sequential partial images is introduced. This method consists of three steps: the small areas of the part are imaged and then the sequential partial images are overlapped at adjacent margins one by one. The cross-correlation matching technique and the bilinear interpolation algorithm are applied to obtain the dimension characteristic lines of the adjoining sequential images at sub-pixel level and the corresponding dimension characteristics of each partial image, and these sizes are summed and compensated to get the part dimension. The experimental results show that for the edge pixel compensation method to the single image of general scale part, the relative error is less than 0.008%, and for the sequential image measurement method to the large scalar part, the relative error is less than 0.01%, which indicates that the

收稿日期:2007-07-13;修订日期:2007-08-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 70272046)

proposed method has the advantage of small error accumulation and can meet the needs of the precise auto-measurement of sheet metal parts.

Key words: vision measurement; image processing; sequential image; edge compensation; feature matching

1 引言

视觉测量由于具有连续性、非接触和易于实现自动化等优点,成为机械零件测量的一种革新手段^[1]。然而,在基于单幅图像处理的机器视觉系统中,由于成像区域和检测分辨率之间成反比例关系,要取得精加工常用的测量精度,成像区域必须限制在较小的范围内。因此,这种方法通常用来测量微小结构^[2-3]或者尺寸较小的零件^[4]。另一方面,机器视觉系统拍摄的图像在远离图像中心处存在较大的畸变^[5],而图像畸变是影响测量精度的一个重要因素。为了把机器视觉应用于普通尺寸机械零件和大尺寸机械零件的高精度测量,必须解决当前测量范围过小这一问题,并设法减小图像畸变对测量精度的影响。

对于常规尺寸和大尺寸的机械零件,较小的视野范围只能摄取到零件的局部图像。采用将序列局部图像拼接成全局图像的方法^[6-7],一方面可以用较高的检测分辨率获得待测零件在尺寸方向的全貌;另一方面,在拍摄序列图像时,使成像区域尽可能靠近成像平面中心位置,又可有效减小图像畸变对测量精度的影响。但是,当序列图像很多时,由于数据量大,受处理速度和拼接精度的制约,很难适应快速高精度的测量要求。因此,不进行图像拼接,而是提取序列局部图像的尺寸特征,并以图像序列之间的关联关系为依据来求解零件尺寸,是实现机械零件高精度快速测量的一种新方法。

2 机械零件图像边缘处理方法

受视觉传感器件的特性和光学衍射效应的影响,零件图像边缘存在一个过渡区域,使得精确确定边缘的实际位置有一定难度。因此,机械零件图像边缘的处理方法是决定测量精度的关键技术之一^[8]。在利用序列局部图像进行尺寸测量时,零件边缘像素和非边缘像素具有不同的尺寸

计算因子,需要对其进行区分和量化。

2.1 机械零件图像边缘特征对测量精度的影响

机械零件边缘往往存在直角、倒角或者倒圆等细部特征,这些特征对用来照明被测平面的光线具有散射作用,并在视觉成像时产生不同程度的光学衍射效应,使机械零件图像边缘呈现出一个跨若干像素的灰度过渡分布区域。图 1 所示是一长方形零件在白色背景前的图像(分辨率为 256 pixel×256 pixel),图 2 是该零件图像右边缘的灰度分布图。由图可见,理论上应该呈阶跃状的灰度分布图,变成了斜坡形分布^[9],过渡区跨越了 6 个像素单位。

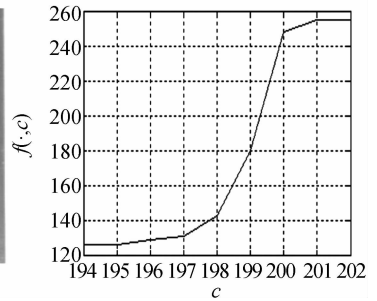


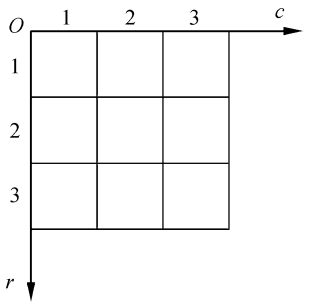
图 1 机械零件图像 图 2 零件图像边缘灰度分布图
Fig. 1 Image of a machine part Fig. 2 Gray scale distribution of part edge image

机械零件图像边缘灰度的这种过渡分布特征,对确定零件边缘的精确位置,实现高精度测量造成了很大的困难。一方面,零件边缘细部形状不同,所产生的光学衍射效应就会不同,同时,细部特征尺寸不同,所产生的光学衍射效应就有程度上的差别,反映在视觉图像上,就是图像边缘过渡区的灰度分布不同^[10]。但是,视觉传感器的光敏面是以像元为单位来分辨入射光强的,像元的不可无限细分性,决定了以像素为单位的图像边缘过渡区不能分辨差别细微的光学衍射效应,而这种细微差别却是确定真实边缘位置所必须的;另一方面,在以像素当量为计算单位的视觉测量中,像素当量值代表了该视觉系统所能达到的最高像素级测量精度。但是,像素当量值是有下界的,以分辨率为 1 024 pixel×1 024 pixel 的视觉

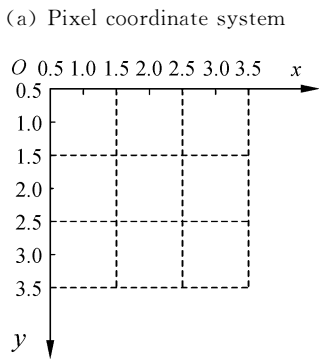
传感器为例,当标定视野范围为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$, 标定区图像分辨率为 $1\ 000\text{ pixel}\times 1\ 000\text{ pixel}$ 时,像素当量值只能达到 0.01 mm/pixel 。机械零件图像边缘的跨像素过渡特征,使像素级边缘误差在一个像素当量以上。由此可见,要达到精加工使用的微米级测量精度,必须进行像素细分,取得亚像素计算当量,并在不能精确确定实际边缘位置的情况下,设法消除边缘过渡区对测量精度的影响。

2.2 机械零件图像边缘像素补偿法

针对机械零件图像边缘灰度的分布特征,为了消除边缘过渡区对测量精度的影响,提出了一种不依赖于成像参数的边缘像素补偿法。在介绍该方法前,先定义本文图像处理方法中使用的 2 个图像坐标系统,以及与坐标相关的 6 个函数。



(a) 像素坐标系



(b) 数值坐标系

(b) Numerical coordinate system

图 3 图像的像素坐标系与数值坐标系

Fig. 3 Pixel coordinate system and numerical coordinate system

如图 3 所示,在图 3(a) 像素坐标系中,坐标单位以像素为单位, r 轴表示图像阵列的行数, c 轴表示图像阵列的列数,函数 $pc(\cdot)$ 、 $pcr(\cdot)$ 、 $pcc(\cdot)$ 分别表示图像上某点在像素坐标系中的坐标

值、行坐标值以及列坐标值;在图 3(b) 数值坐标系中,坐标单位以浮点数为单位,函数 $dc(\cdot)$ 、 $dcx(\cdot)$ 、 $dcy(\cdot)$ 分别表示图像上某点在数值坐标系中的坐标值、 x 坐标值以及 y 坐标值。需要注意的是,数值坐标系原点 O 的坐标为 $dc(O) = (0.5, 0.5)$, 这样图像中任一像素的中点在像素坐标系与数值坐标系中具有相同的坐标值。

以图 1 长方形零件两直线边缘之间的距离 l 的测量为例,来说明机械零件图像边缘像素补偿法。分别以 e_l 、 e_r 表示零件的左、右边缘,在视觉成像时,调整 e_l 近似平行于数值坐标系的 y 轴,根据机械零件图像边缘灰度的过渡分布特征,则过渡区沿 x 方向分布,设图像的分辨率为 $R\text{ pixel}\times C\text{ pixel}$, A 为图像中任一点, $pc(A) = (r, c)$, 则图像函数为

$$I = f(A) = f(r, c), 1 \leq r \leq R, 1 \leq c \leq C. \quad (1)$$

为得到亚像素计算当量和边缘像素补偿值,取长度分别为 L_1 、 L_2 ($L_1 \neq L_2$) 的标定块对视觉测量系统进行标定,然后计算待测尺寸 l , 处理步骤如下:

(1) 计算标定块沿 c 轴的归一化灰度均值 $E(c)$,

$$E(c) = \frac{1}{255 \cdot R} \sum_{r=1}^R f(r, c), 1 \leq c \leq C. \quad (2)$$

(2) 计算 $E(c)$ 沿 c 轴正向的一阶差分 $\Delta E(c)$,

$$\Delta E(c) = E(c+1) - E(c), 1 \leq c \leq C-1. \quad (3)$$

(3) 设定边缘像素差分阈值 T , 搜索边缘过渡区域 $\{G(k); 1 < s \leq k \leq t < C-1\}$, $G(k)$ 满足

$$G(k) \in \{E(c); |\Delta E(c)| > T\}. \quad (4)$$

由于机械零件图像边缘的过渡分布特征,对于长方形零件,搜索到的 $\{G(k); 1 < s \leq k \leq t < C-1\}$ 是沿 c 轴分布的两个灰度单调区域,即 $G(k) \in \{E(c); s \leq c \leq t\}$ 。

(4) 确定左、右边缘 x 轴亚像素坐标 $dcx(e_l)$ 、 $dcx(e_r)$, 计算两边缘之间的亚像素距离

$$dcx(e_l) = t - \frac{1}{t-s+1} \frac{\sum_{k=s}^t G(k) - G(s)}{G(t) - G(s)} \times (t-s), \quad (5)$$

$$dcx(e_r) = s + \frac{1}{t-s+1} \frac{\sum_{k=s}^t G(k) - G(s)}{G(t) - G(s)} \times (t-s), \quad (6)$$

$$d = dcx(e_r) - dcx(e_l). \quad (7)$$

(5) 计算像素当量 δ ,

$$\delta = \frac{L_2 - L_1}{D_2 - D_1}, \quad (8)$$

式中, D_1 、 D_2 分别是 L_1 、 L_2 的亚像素长度。

(6) 计算边缘像素补偿值 λ , 由 $(D_1 + 2\lambda) \times \delta = L_1$ 及式(8)可得

$$\lambda = \frac{L_1 \times D_2 - L_2 \times D_1}{2(L_2 - L_1)}, \quad (9)$$

(7) 计算待测尺寸 l

$$l = (d + 2\lambda) \times \delta, \quad (10)$$

式中, d 为待测件两边缘的亚像素距离, 其计算方法见式(7)。

以上方法的优点是在计算像素当量 δ 时, 通过 $D_2 - D_1$ 可获得非边缘像素的计算当量。边缘像素对测量精度的影响, 通过边缘像素补偿值 λ 计入最后的测量值。只要在步骤(4)确定边缘亚像素坐标时, 待测件与标定件采用同样的亚像素算法, 这种方法即可消除实际边缘不能精确确定对测量的影响, 从而获得较高的测量精度。

3 基于序列局部图像的尺寸测量方法

基于序列局部图像尺寸特征的测量方法(以下简称“序列图像测量法”)的原理是: 先对零件进行微小区域成像, 生成在空间上连续的序列局部图像; 然后利用序列局部图像在空间上的连续性, 提取各局部图像的尺寸特征, 并得到序列尺寸之间的关联关系; 最后对序列尺寸求和, 得到零件的总体尺寸。具体方法如图 4 所示, 沿尺寸方向采集待测零件的序列局部图像 $S_i (i=1, 2, \dots, n)$ (S_i 像素坐标系的 c 方向与尺寸方向一致, 为使图面

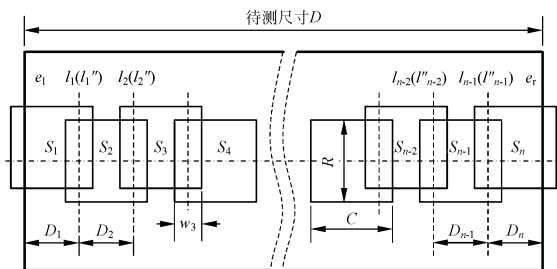


图 4 基于序列局部图像的尺寸测量方法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of dimension measurement method based on sequential partial images

清晰, S_{i+1} 与 S_i 在 r 方向相错表示), 使相邻的局部图像视野具有重叠区域 w_i ; 在重叠区域构造尺寸特征线 $l_i (i=1, \dots, n-1)$, 使 l_i 垂直于尺寸方向, 从而获得各局部图像的尺寸特征 $D_i (i=1, 2, \dots, n)$; 最后求和得到待测尺寸 $D = \sum_{i=1}^n D_i$ 。该方法的关键点在于局部图像尺寸特征的提取。

3.1 序列局部图像尺寸特征提取

设局部图像的大小为 $R \text{ pixel} \times C \text{ pixel}$, S_i 与 S_{i+1} 的重叠区域在测量方向的长度为 $w_i \text{ pixel}$, 且 $w_i \geq \frac{C}{10}$ 。尺寸特征提取过程如下:

3.1.1 在 S_i 上构造尺寸特征线 l_i

在 S_i 上取线段 AA' , 其中点为 A'' , AA' 满足: AA' 平行于 c 轴, $pcc(A'') = \left(\frac{R}{2}, C - \text{fix}\left(\frac{w_i}{2}\right)\right)$, 长度为 $\text{fix}\left(\frac{w_i}{4}\right) \times 2 - 3 \text{ pixel}$ 。其中, $\text{fix}(\cdot)$ 为向坐标原点方向取整函数。 $A_i (i=1, \dots, s)$ 是构成 AA' 的 s 个像素点, 且 $s = \text{fix}\left(\frac{w_i}{4}\right) \times 2 - 3$ 。在序列

图像 S_{i+1} 上, 在以像素点 $\left(\frac{R}{2}, \text{fix}\left(\frac{w_i}{2}\right)\right)$ 为中心, 以 $\text{fix}\left(\frac{w_i}{4}\right) \times 2 - 1$ 为边长的正方形区域内, 应用相关系数法^[11]搜索 $A_i (i=1, \dots, s)$ 的匹配点 $A_i' (i=1, \dots, s)$ 。设 $A_k, A_k' (1 \leq k \leq s)$ 为所有匹配点对中相似度最大的一对, 在 S_i 上过点 A_k 取与线段 AA' 相垂直的线 l_i, l_i 即为尺寸特征线, 且

$$pcc(l_i) = pcc(A_k). \quad (11)$$

3.1.2 在 S_{i+1} 上搜索 l_i 的匹配线 l_i''

在 l_i 上以点 A_k 为起点, 以 $h (1 \leq h < \frac{R}{20}, h \in \mathbb{Z})$ 为步长, 分别沿 r 轴的正、反方向取点 $B_j (j=1, \dots, t)$, B_j 满足: $B_j \in l_i$, 且 $\text{fix}\left(\frac{w_i}{4}\right) < pcr(B_j) < R - \text{fix}\left(\frac{w_i}{4}\right)$ 。在序列图像 S_{i+1} 上, 在 $pcc(\cdot) \in [pcc(A_k') - 1, pcc(A_k') + 1]$ 的长方形区域内, 应用相关系数法^[11]搜索 $B_j (j=1, \dots, t)$ 的像素级匹配点 $B_j' (j=1, \dots, t)$ 。

为获得较高的测量精度, 需求取 B_j 的亚像素级匹配点 B_j'' 。为此, 提出如下亚像素尺寸特征匹配法。

取 $n=2m(m \geq 10, m \in \mathbb{Z})$, 如图 5(a) 所示, 设 B_j 的中点为 B_{mm} , 其周围的 8 个像素的中点为 $B_{00}, B_{0m}, B_{0n}, B_{m0}, B_{mm}, B_{n0}, B_{nm}, B_{nn}$, 对此 9 个点构成的 4 个小正方形区域进行 $m \times m$ 等分, 得到 (b) 所示的 $n \times n$ 细分区域, 共有 $(n+1)^2$ 个节点 $B_{ij} (i, j=0, 1, \dots, n)$, 由双线性插值法^[12], 可求得其余各节点的灰度值。同理, 在 S_{i+1} 图像上, 对 B_j' 周围区域进行同样的亚像素细分, 得到 $(n+1)^2$ 个节点 $B_{ij}' (i, j=0, 1, \dots, n)$ 。

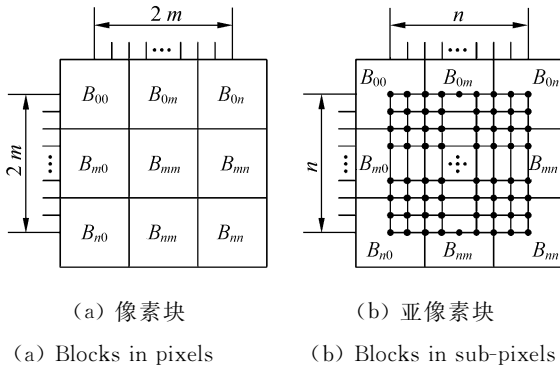


图 5 亚像素细分示意图

Fig. 5 Schematic diagram of sub-pixel subdivision

然后, 以 B_{mm} 为中心, 取 $2u \times 2u (2u < m, u \in \mathbb{Z})$ 的亚像素模板, 在以 B_{mm}' 为中心的正方形区域 $(2u+m) \times (2u+m)$ 内, 运用相关系数法^[11] 搜索 B_{mm} 的亚像素匹配点 B_{mm}'' , 即为 B_j 的 $1/m$ 级的亚像素匹配点 B_j'' , $dc(B_j'') = dc(B_{mm}'')$ 。从而得到 l_i 的匹配线 l_i'' , l_i'' 平行于 y 轴, 且满足

$$dcx(l_i'') = \frac{1}{t} \sum_{j=1}^t dcx(B_j'') \quad (12)$$

3.1.3 计算 S_i 的尺寸特征 D_i

建立尺寸特征线后, 即可得到序列局部图像 S_i 的尺寸特征 D_i ,

$$D_i = [pcc(l_i) - dcx(l_{i-1}'')] \times \delta, i=2, \dots, n-1 \quad (13)$$

3.2 基于序列局部图像尺寸特征的测量计算

得到序列局部图像的尺寸特征后, 就可以通过求和计算零件的待测尺寸。需要注意的是, 含零件左、右边缘的局部图像要进行边缘补偿, 需用式(10)来计算, 即,

$$D_1 = (pcc(l_1) - dcx(e_1) + \lambda) \times \delta, \quad (14)$$

$$D_n = (pcc(e_n) - dcx(l_{n-1}'') + \lambda) \times \delta. \quad (15)$$

由式(13)、(14)、(15), 即可得到待测尺寸 D ,

$$D = \sum_{i=1}^n D_i = [pcc(l_1) - dcx(e_1) + dcx(e_n) - dcx(l_{n-1}'') + \sum_{i=2}^{n-1} (pcc(l_i) - dcx(l_{i-1}'')) + 2\lambda] \times \delta. \quad (16)$$

序列图像测量法的优点在于, 把大尺寸机械零件的测量“化整为零”, 得以发挥视觉检测的优势; 然后再“集零成整”, 发挥计算处理的长处。测量误差的积累只取决于序列图像之间特征的选取与匹配精度, 这是图像处理算法问题, 问题的转化为提高大尺寸的测量精度开辟了新的途径。

4 实验结果及其讨论

采用 Photonfocus 公司生产的 MV-D1024-28-CL-10 型 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ CMOS 相机, 利用其 ROI (Region Of Interest) 功能设置 $384 \text{ pixel} \times 384 \text{ pixel}$ 的成像区域, 并使其位于光敏面的中心, 这样一方面可以减小图像畸变, 另一方面可以获得 210 frame/s 的较高帧频。用一级精度的标准量块对测量系统做标定, 应用式(8)、(9)计算系统的像素当量和边缘像素补偿值, 标定数据见表 1。

表 1 视觉测量系统标定数据

Tab. 1 Calibration data of vision measurement system

量块	左边缘亚像素坐标	右边缘亚像素坐标	像素当量 δ	边缘像素补偿值 λ
	$dcx(e_1)$	$dcx(e_r)$	(mm/pixel)	(pixel)
(mm)	(pixel)	(pixel)	(mm/pixel)	(pixel)
5.12	99.62	149.39	0.100 04	0.705
10.24	79.08	180.03		

首先采集常规尺寸长方形零件的单幅图像, 进行边缘补偿实验。结果表明, 相对测量误差均在 0.008% 以内, 达到了 IT2 公差等级, 可满足精密测量的要求, 实验测量数据见表 2。

表 2 边缘像素补偿法实验数据

Tab. 2 Experimental data of edge pixels compensation method

试件尺寸 (mm)	左边缘亚像素坐标 $dcx(e_l)$ (pixel)	右边缘亚像素坐标 $dcx(e_r)$ (pixel)	测量值 l (mm)	相对误差
15.36	46.08	198.22	15.361 1	0.007 4%
21.5	49.28	262.80	21.501 6	0.007 3%
25	57.88	306.39	25.002 0	0.007 9%

然后采集大尺寸直边零件的序列局部图像,采用 C++ 编写图像处理算法,应用相关系数法搜索各次匹配点时,均取 $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$ 大小的模板,对序列图像进行 $1/100$ (即 $m=100$) 级的亚像素尺寸特征提取,应用式(16)求得测量值如表 3 所示。实验结果表明,相对测量误差均在 0.01% 以内,达到了 IT5 公差等级,误差积累并不明显。在 Pentium(R) 4 CPU 2.8 GHz, 1.0 GB 内存的计算机上处理速度不超过 2 s,说明这种方法用于机械零件尺寸的高精度快速测量是可行的。

表 3 基于序列局部图像的尺寸测量实验数据

Tab. 3 Experimental data of dimension measurement based on sequential partial images

试件尺寸 (mm)	序列图像尺寸特征(pixel)			测量值 l (mm)	相对误差	处理时间 (s)
	D_1	$\sum_{i=2}^{n-1} D_n$	D_n			
100.01	95.36	888.71	15.72	100.019 0	0.009 0%	0.91
150.98	100.41	1 382.66	26.27	150.994 4	0.009 6%	1.43
200.18	97.42	1 879.55	24.21	200.198 0	0.009 0%	1.89

参考文献:

- [1] MALAMAS E N, PETRAKIS E G M, ZERVAKIS M. A survey on industrial vision system, application and tools [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21: 171-188.
- [2] YOON H S, CHUNG S C. Vision inspection of micro-drilling processes on the machine tool [J]. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institute of SME*, 2004, 32: 391-398.
- [3] KWON Y J, TSENG T L, ERTEKIN Y. Characterization of closed-loop measurement accuracy in precision CNC milling [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2006, 22 (4): 288-296.
- [4] 贺秋伟,王龙山,刘庆民,等.基于支持向量回归的小尺寸零件精密测量[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(4): 557-563. HE Q W, WANG L SH, LIU Q M, et al.. Precision measurement for small size parts based on support vector regression [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 557-563. (in Chinese)
- [5] 周富强,胡坤,张广军.基于共线特征点的摄像机镜头畸变校正[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(9): 174-177. ZHOU F Q, HU K, ZHANG G J. Correcting distortion of camera lens with collinear points [J]. *Chinese Journal*

从实验结果来看,序列图像测量法通过限制成像区域,得以利用畸变小的图像来测量大尺寸机械零件,具有误差积累小的优点,测量精度能满足普通机械精密测量的要求。但是,序列图像尺寸特征的匹配是建立在图像序列之间的相关性基础之上的。在采集序列图像过程中,相机与待测零件沿尺寸方向有 D_i 的相对平移运动后,尺寸特征线 l_i 与其匹配线 l_i'' 在相邻序列上应具有相同的成像条件,否则匹配精度将降低,误差积累将加大,这对均匀照明及测量环境相对稳定都提出较高要求。另一方面,本文以直线边缘之间距离的测量为原型来介绍序列图像测量法,应用面比较窄,如何把这种“化整为零,集零成整”的思想方法扩展到复杂特征的测量,将是后续研究的方向。

5 结 论

针对机械零件图像边缘的过渡分布特征,提出用边缘像素补偿法来消除实际边缘不能精确定位对测量精度的影响,对常规尺寸零件的单幅图像进行补偿测量,相对误差在 0.008% 以内。为了把视觉检测的优点应用于大尺寸机械零件的测量,提出基于序列局部图像的尺寸测量法,对直线边缘零件的测量结果表明,相对测量误差在 0.01% 以内,并具有误差积累小的优点。该方法可应用于板类零件尺寸的精密自动化测量。

of *Mechanical Engineering*, 2006, 42(9):174-177. (in Chinese)

- [6] WANG X, ZHAO ZH Q. High-precision image mosaic method in big frame measurement [C]. *1st International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics, Piscataway, United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society*, 2006: 203-207.
- [7] 陈世哲,胡涛,刘国栋,等. 基于光栅的快速精确图像拼接[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2):242-246.
CHEN SH ZH, HU T, LIU G D, *et al.*. Fast and precision image mosaic based on grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2):242-246. (in Chinese)
- [8] 付树军,阮秋琦,穆成坡,等. 基于非线性扩散滤波的边缘检测和图像测量[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2):289-293.
FU SH J, RUAN Q Q, MU CH P, *et al.*. Edge detection for image measurement based on nonlinear diffusion filtering [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 289-293. (in Chinese)
- [9] 张广军. 机器视觉[M]. 北京:科学出版社, 2005.
ZHANG G J. *Machine Vision* [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [10] 王宇华,彭明仔,程湘. 精加工零件尺寸视觉检测中的亚像素定位分析[J]. *纳米技术与精密工程*, 2006, 4(4):311-313.
WANG Y H, PENG M Z, CHENG X. Subpixel localization in vision measurement for the size of precision part [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2006, 4(4): 311-313. (in Chinese)
- [11] 程辉,田金文,柳健. 支持向量像素抽样的快速图像匹配方法[J]. *光电工程*, 2005, 32(12):39-42.
CHENG H, TIAN J W, LIU J. Novel image matching algorithm based on support vector machines [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(12):39-42. (in Chinese)
- [12] 孙成叶,桑农,张天序,等. 图像双线性插值无级放大及其运算量分析[J]. *计算机工程*, 2005, 31(9):167-169.
SUN CH Y, SANG N, ZHANG T X, *et al.*. Image bilinear interpolation enlargement and calculation analysis [J]. *Computer Engineering*, 2005, 31(9): 167-169. (in Chinese)

作者简介:何博侠(1972—),男,博士研究生,主要从事机器视觉检测与测量技术、机电控制与自动化等方面的研究。E-mail: heboxia@163.com

导师简介:史金飞(1964—),男,教授,博士生导师,研究方向为光、机、电系统工程与一体化技术。E-mail: shijf@seu.edu.cn

●下期预告

微型零件图像测量清晰度算法的选择与综合评价算法

张俊杰¹, 操晶晶¹, 贡力¹, 唐红², 王仲¹, 叶声华¹

(1. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

2. 天津师范大学经济学院, 天津 300387)

建立了图像测量清晰度算法的选择与综合评价算法,对各种算法的优化与统一进行研究。基于微型精密零件的成像测量方法,使用远心成像测量系统在不同工作距离处进行了图像采集,然后使用相关算法进行清晰度评价,最后对所得数据进行主成分分析和因子分析。从8种适用于微型精密零件灰度图像的清晰度评价算法计算出适用于微型零件光学影像测量使用的评价算法,并建立了综合清晰度评价模型。结果表明:本文的数据处理模式能够对微型零件图像测量系统清晰度算法进行选择并解决不同算法间的协调问题。在保证评价效果不变的前提下,数据量由优化前的1408组数据优化为176组数据。而且本文提出的数据挖掘算法能针对同一要求的不同评价价值进行选择及综合。

(本栏目编辑 黄廉卿)